سال سی و چهارم، شمارهٔ یک، ۱۴۰۰
DOI: 10.22067/jfcei.2021.61548.0

بررسی موجک‌های متعامد در تشخیص خرابی برج توربین بادی با اندرکنش خاک- سازه*

مقاله پژوهشی

محسن مهر مطلق[۱]　　آرش بهار[۲]　　امید بهار[۳]

چکیده انرژی باد از مهم‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که دارای روند رو به ر شد نیز ا ست. برج توربین بادی، نگه‌دارنده کل مجموعه ا ست و خرابی آن منجر به فاجعه‌ی کامل می‌گردد. بااینکه خرابی برج می‌تواند کل توربین بادی را به‌خطر اندازد و سبب خرابی و سیع گردد ولی تحقیقات در این بخش از توربین نسبت‌به تأسیسات مکانیکال توربین بادی، ناچیز است. در این تحقیق، تحلیل گسترده‌ی عددی به‌منظور ت شخیص خرابی در برج توربین بادی تو سط تجزیه‌ی موجک دوبعدی چند سطحه باا ستفاده از موجک‌های متعامد و اندرکنش خاک- سازه، انجام گردیدها ست. مدل المان محدود تهیه شده، با توربین بادی ساحلی مبنای پنج مگاواتی آزمای شگاه ملی انرژی تجدیدپذیر وزارت نیروی آمریکا، صحت سنجی شد. در ادامه ضمن تعریف چندین سناریوی خرابی، شکل‌های مودی سه‌بعدی مدل المان محدود سازه‌ی آسیب‌دیده، ا ستفاده از روش پی شنهادی، مورد برر سی قرار گرفتند. نتایج حاکی از تأثیر مثبت اندرکنش خاک- سازه بر افزایش کیفیت ت شخیص خرابی سازه‌ی آسیب‌دیده، است.

واژه‌های کلیدی برج توربین بادی، تشخیص خرابی، اندرکنش خاک- سازه، پردازش سیگنال، موجک متعامد.

Investigation of Orthogonal Wavelets in the Damage Detection of the Wind Turbine Tower with Soil-Structure Interaction

M. Mehr Motlagh　　A. Bahar　　O. Bahar

Abstract *Wind energy is one of the most hopeful renewable energy sources that is also growing. The wind turbine tower supports the complete wind turbine system, and its damage may cause catastrophic failure of the wind turbine. However, the background to the study of the health monitoring of the wind turbine tower against its mechanical installations is insignificant. Besides, no comprehensive research has been conducted on the health monitoring of the tower with soil-structure interaction included. In this article, the extensive analysis of the multilevel 2D wavelet decomposition approach using orthogonal wavelets and soil-structure interaction is performed numerically. The established finite element model is calibrated and verified with the NREL 5-MW reference onshore wind turbine. Then, while defining several damage scenarios, the 3-dimensional modes of the finite element model of the damaged structure were investigated using the proposed method. The findings imply that the quality of the damage detection in the soil-structure interaction models has increased, generally.*

Key Word Wind Turbine Tower, Damage Detection, Soil-Structure Interaction, Signal Processing, Orthogonal Wavelets.

---

* تاریخ دریافت مقاله۱۳۹۸/۹/۲۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۲/۸ می‌باشد.

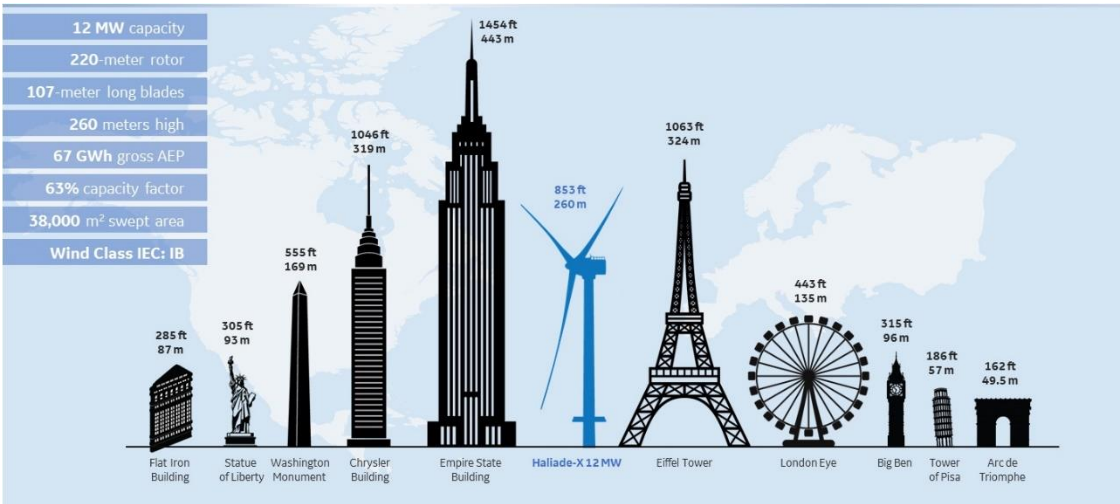
(۱) گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین.
(۲) نویسنده‌ی مسئول، استادیار، دانشکده‌ی فنی- مهندسی دانشگاه گیلان، رشت.
(۳) استادیار، پژوهشکده‌ی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران.
Email: bahar@guilan.ac.ir

مقدمه

توسعه‌ی منابع انرژی پاک به‌عنوان نیاز حیاتی سلامت بشر و محیط، در حال رشد است. انرژی باد یکی از مهم‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر است که آلودگی محیطی بسیار ناچیزی دارد. توربین‌های بادی، انرژی جنبشی را از باد می‌گیرند و آن را تبدیل به انرژی الکتریکی می‌کنند. برخلاف نیروگاه‌های انرژی سنتی، توربین‌های بادی منجربه انتشار گازهای گلخانه‌ای یا آلودگی‌های هوا نمی‌شوند [1]. سهم انرژی بادی در سال ۲۰۰۱ تنها ۲٤ گیگاوات بوده درحالی‌که این مقدار در سال ۲۰۱۸ به ۵۹۱ گیگاوات یعنی بیست و پنج برابر هفده سال قبل رسیده‌است. روند سرمایه‌گذاری در انرژی بادی کماکان مثبت ارزیابی می‌شود به‌گونه‌ای که در پایان سال ۲۰۲۳ مقدار انرژی تجمعی توربین‌های بادی جهان برابر ۹۰۸ گیگاوات پیش‌بینی می‌گردد [2].

توربین‌های بادی همیشه در مکان‌هایی جانمایی می‌گردند که منابع بادی قابل استفاده، در دسترس باشند. این مکان‌ها به‌طور معمول در موقعیت‌های باز و خارج از شهرها و مناطق مسکونی هستند. بهره‌برداری پیوسته، ایمن و سودمند چنین دستگاه‌هایی، خود یک چالش مهندسی می‌باشد. ظرفیت و اندازه‌ی توربین‌های بادی به‌منظور کسب بیشتر انرژی از باد، به‌سرعت در حال افزایش است [3]، به‌طوری‌که شرکت GE در حال برنامه‌ریزی برای نصب آزمایشی بزرگ‌ترین توربین بادی فراساحلی دوازده‌مگاواتی به‌ارتفاع ۲٦۰ متر و در آب‌های مشرف‌به بندر رتردام در سال ۲۰۱۹ است [4] (شکل ۱). البته تحقیقات نشان می‌دهند که توربین‌های عظیم‌تر به‌مراتب بیشتر خراب می‌شوند و نیازمند نگهداری بیشتری هستند [5]. مطابق مطالعات مرجع [6] برج توربین بادی ساحلی جایگاه دوم را در کل هزینه‌ی توربین بادی دارد و این در حالی است که کل مجموعه‌ی توربین بادی نیز توسط این قسمت نگهداری می‌گردد و خرابی آن، باعث آسیب فاجعه‌بار برای کل توربین می‌شود. تمامی این مسائل، سبب شده‌است که صاحبان مزارع توربین بادی دریابند که تشخیص خرابی، نقش مؤثری در بهره‌برداری ایمن و پیوسته از توربین‌های بادی ایفا می‌کند.

تشخیص خرابی سازه‌ی برج توربین بادی، پیشینه‌ی مطالعاتی بسیار کمتری نسبت‌به پره‌ی توربین و تأسیسات مکانیکال آن دارد. هم‌چنین درمورد این مقوله همراه با اندرکنش خاک- سازه مطالعه‌ای صورت نگرفته‌است. ازاین‌رو، باتوجه به اهمیت حیاتی سلامت برج توربین بادی، ضرورت تحقیق در این مقوله احساس می‌شود.



شکل ۱ نمای مقایسه‌ای توربین بادی فراساحلی دوازده مگاواتی Haliade-X شرکت GE [4]

هدف این تحقیق

در این مقاله، مدل المان محدود توربین بادی بااستفاده از نرم‌افزار Abaqus/CAE تهیه گردیده‌است. این مدل با توربین بادی ساحلی مبنای پنج مگاواتی آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر وزارت نیروی آمریکا (NREL)، مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. از تبدیل موجک (متعامد) برای تعیین موقعیت آسیب در توربین بادی استفاده شده‌است. ورودی تبدیل موجک در این حالت، شکل‌های مودی سازه‌ی آسیب‌دیده هست و خروجی آن ضرایب تبدیل موجک می‌باشند. به‌منظور ارزیابی کیفیت تشخیص خرابی در دو موقعیت خرابی مختلف، حالات با/ بدون اندرکنش خاک- سازه برای خاک‌های مفروض، تعداد هجده سناریوی خرابی تعریف شد که بااستفاده از سی و یک موجک متعامد نرم‌افزار MATLAB و سه سطح مختلف، تحلیل‌های گسترده‌ای صورت گرفت و نتایج قابل قبولی نیز کسب گردید.

ادبیات فنی تبدیل موجک و اندرکنش خاک- سازه

سوندرسون و دیگران [7] به بررسی پایش سلامت سازه بااستفاده از اندازه‌گیری موج تنش که در خلال آزمایش استاتیک پره در آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر آمریکا صورت گرفت، پرداختند. موجک کلاه‌مکزیکی به‌منظور تشخیص خرابی در پره، مورد استفاده قرار گرفت. فن و کیائو [8] یک الگوریتم تشخیص خرابی براساس تبدیل موجک پیوسته‌ی دوبعدی برای سازه‌های نوع صفحه‌ای براساس روابط مرجع [9]، ارائه دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که الگوریتم مطالعه‌شده علاوه‌بر برتری در مصونیت برابر نویز، قادر به تشخیص خرابی با حسگرهای محدود نیز می‌باشد. در مطالعه‌ی دیگر، دولینسکی و کرازوک [10] یک روش تشخیص خرابی براساس تبدیل موجک برای تشخیص خرابی پره‌های توربین‌های بادی بزرگ در خلال شرایط طبیعی بهره‌برداری ارائه دادند.

کنا و باسو [11] برروی تشخیص موضعی خرابی برج توربین بادی تمرکز کردند. آنها از الگوهای کرنش فضایی به‌منظور تعیین موضعی خرابی اطراف پوسته‌ی برج سه‌بعدی استفاده نمودند. به‌علاوه، هانگ و دیگران [12] با بهره از تبدیل موجک گسسته به بررسی مشخصه‌های مودال پاسخ‌های ناشی از زلزله برروی سازه پرداختند. در این تحقیق روی پاسخ‌های شتاب‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی سازه، تبدیل موجک انجام یافت و روابط گسسته بااستفاده از زیرفضای موجک ساخته شد. در مطالعه‌ی دیگر، هی و دیگران [13] با هدف دست‌یابی به تناسبی میان هزینه‌ی محاسباتی و دقت، به ارائه‌ی روش تشخیص خرابی چندمقیاسه (multi-scale) به‌منظور سازگاری مدل‌سازی سازه‌ای با پردازش سیگنال، پرداختند. در این روش با ترکیب مدل المان‌محدود پایه‌ی موجک و به‌کارگیری موجک B-spline به‌عنوان تابع شکل و روش شناسایی مودال پایه‌ی موجک، خرابی سازه تشخیص داده شد.

زاجر [14] در سال ۲۰۰۲ رفتار دینامیکی پی‌های توربین‌های بادی فراساحلی را مدل‌سازی نمود و حساسیت فرکانس طبیعی تکیه‌گاه سازه را نسبت‌به انواع پی‌ها مطالعه کرد. این کار توسط کمپ و دیگران [15] در سال ۲۰۰۳ گسترش داده شد و عدم قطعیت چندین مشخصه‌ی ژئوتکنیکی کلیدی مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق نشان داد حساسیت پی‌های سطحی نسبت‌به پارامترهای خاک، بیشتر از پی‌های شمعی است. با دنبال کردن این موضوع توسط زاجر [16] در سال ۲۰۰۶، حساسیت فرکانس طبیعی تکیه‌گاه سازه نسبت‌به ارتعاشات مدل‌های پی‌های شمعی، نشان داده شد. مورتاق و دیگران [17] در سال ۲۰۰۵ نشان دادند که درنظر گرفتن سیستم خاک- پی منعطف، اثر کاهشی بر فرکانس طبیعی پی توربین بادی دارد و باعث مقدار قابل‌توجهی میرایی در سیستم می‌شود. بوش و مانوئل [18] در سال ۲۰۰۹ مدل‌های پی با تکیه‌گاه گیردار و انعطاف‌پذیر را با یکدیگر مقایسه کردند و نشان دادند که

درنظر گرفتن سیستم خاک- پی می‌تواند در پاسخ دینامیکی توربین تأثیرگذار باشد.

ادهیکاری و هاتاچرا [19] در سال ۲۰۱۲ رفتار دینامیک توربین‌های بادی را روی پی‌های انعطاف‌پذیر که در معرض بارهای موج و باد قرار دارند بررسی کردند. مدل ایشان براساس تیر- ستون اولر- برنولی بود و تکیه‌گاه‌های انتهایی الاستیک به‌منظور مدل کردن طبیعت انعطاف‌پذیر اندرکنش این سیستم‌ها با پی، درنظر گرفته شد. فیتزجرالد و باسو [20] در سال ۲۰۱٦ به اهمیت درنظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه در کنترل سازه‌ای توربین‌های بادی پرداختند و نشان دادند هنگامی‌که درمورد سختی خاک شبهاتی وجود دارد، طرح کنترل غیرفعال لرزش ممکن است بی‌تأثیر باشد، به‌علاوه کنترل لرزش توربین‌های بادی بااستفاده از طرح کنترل فعال پیشنهادی ایشان، در شرایطی که مشخصات خاک نامشخص است، امیدوارکننده بود.

تجزیه‌ی موجک دوبعدی چندسطحه

پایش سلامت سازه‌ها شامل پایش لحظه‌ای یک سازه بااستفاده از تعدادی حسگر است که یا داخل سازه مدفون شده‌اند و یا روی آن نصب شده‌اند. اسپکمن ایده‌ی پایش سلامت سازه را بسیار نزدیک به سیستم عصبی انسان می‌داند. درحقیقت بدن انسان از تعداد زیادی حسگر تشکیل شده‌است. این حسگرها اطلاعات خود را به مغز می‌فرستند و مغز پس از تفسیر این اطلاعات، درمورد محل و شدت درد تصمیم‌گیری می‌کند. قابل ذکر است که محل قرارگیری حسگرها در دقت تشخیص خرابی مؤثر است [21].

در یک نگاه کلی، هدف از اعمال یک تبدیل ریاضی بر یک سیگنال، به‌دست آوردن اطلاعات اضافه‌ای است که در یک سیگنال خام اولیه، قابل دسترس نمی‌باشند. درمقایسه با روش‌های مبتنی بر پارامترهای مودال، روش‌های مبتنی بر سیگنال مخصوصا مورد توجه قرار گرفته‌اند زیرا در مواجهه با رفتار غیرخطی و پیچیده‌ی سازه‌ها، داده‌های ناقص و ناکافی و هم‌چنین آغشته به نویز، از عملکرد مطلوب‌تر و مؤثرتری برخوردار هستند.

تحلیل موجک به‌عنوان یکی از ابزار پردازش پنجره‌ای با اندازه‌ی نواحی متغیر معرفی شده‌است. تحلیل موجک یکی از مهم‌ترین و سریع‌ترین ابزارهای پردازش سیگنال در حال پیشرفت در بیست سال اخیر می‌باشد. تجزیه‌ی موجک، مقیاس را به‌عنوان جایگزین فرکانس درنظر می‌گیرد که درواقع یک سیگنال را به بازه‌ی زمان و مقیاس تبدیل می‌کند. روش تحلیل موجک برای کشف آسیب، نیازی به اطلاعاتی از سازه‌ی سالم ندارد که این یک مزیت مهم به‌شمار می‌رود. این روش فقط به‌کمک نتایج تحلیلی که روی سازه‌ی آسیب‌دیده انجام می‌شود اقدام به تعیین محل خرابی می‌کند. در تبدیل موجک از مفهوم پنجره استفاده می‌شود، اما طول پنجره‌ها در فرکانس‌های مختلف، تغییر می‌کند. دراصطلاح به این امر تحلیل چنددقتی گفته می‌شود. منظور از تحلیل چنددقتی، تحلیل سیگنال در فرکانس‌های مختلف با دقت‌های متفاوت است. هدف از تحلیل چنددقتی، ارائه‌ی دقت زمانی مناسب و دقت فرکانس نادقیق در فرکانس‌های بالا و درمقابل، دقت فرکانسی خوب و دقت زمانی ضعیف در فرکانس‌های پایین است. هم‌چنین به‌جای استفاده از موج سینوس از موجک مادر $\psi(t)$ استفاده می‌شود، یعنی،

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \qquad (۱)$$

که در آن a پارامتر مقیاس و b پارامتر جابه‌جایی است. تبدیل موجک یک‌بعدی توسط رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$W_f(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{a,b}(t)dt \qquad (۲)$$

تبدیل موجک گسسته، سیگنال زمان گسسته را به فرم موجک گسسته تبدیل می‌کند؛ یعنی آن سری ورودی $x = [x_0, \cdots, x_{L-1}]^T$ با طول L را به سری ضریب موجک بالاگذر (h) و سری ضریب موجک پایین‌گذر (l) با طول $\frac{L}{2}$ تبدیل می‌نماید.

$$h_j = \sum_{k=0}^{K-1} x_{2j-k}\, s_k,$$

$$l_j = \sum_{k=0}^{K-1} x_{2j-k}\, t_k \quad \forall\, 0 \le j \le \frac{L}{2}$$

(۳)

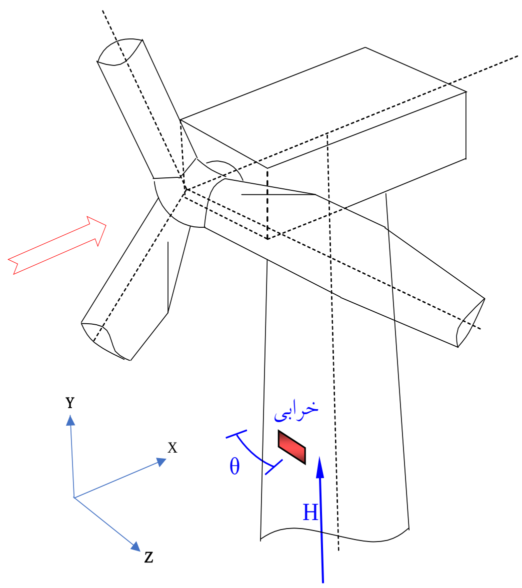
که $t = [t_0, \cdots, t_{K-1}]^T$ و $s = [s_0, \cdots, s_{K-1}]^T$ فیلترهای موجک خوانده می‌شوند.

یادآوری می‌شود $X^{(i)}$ یک ماتریس دوبعدی است که نشانگر شکل مودی سه‌بعدی سازه‌ی آسیب‌دیده است. تبدیل موجک دوبعدی چندسطحه، ماتریس نام‌برده را به چهار ماتریس جزئی $LL_j^{(i)}$، $LH_j^{(i)}$، $HL_j^{(i)}$ و $HH_j^{(i)}$ تجزیه می‌کند که حرف اول متناظر با به‌کارگیری عملگر فرکانسی پایین‌گذر (L) یا بالاگذر (H) برروی ردیف‌های ماتریس مذکور و حرف دوم به اعمال فیلتر برروی ستون‌های $X^{(i)}$ براساس مقیاس j اشاره می‌کند.

روش پیشنهادی تشخیص خرابی

در این تحقیق، پردازش سیگنال برروی پاسخ‌های به‌دست‌آمده از سازه‌ی آسیب‌دیده انجام می‌گیرد. درواقع، شکل مودی برج توربین بادی به‌عنوان سیگنال ورودی و بااستفاده از نرم‌افزار Abaqus/CAE اخذ می‌گردد و بااستفاده از تجزیه‌ی موجک دوبعدی چندسطحه، پردازش سیگنال به‌صورت تحلیل‌های متعدد انجام می‌گیرد. تحلیل‌های گسترده‌ی مورد اشاره، شامل بررسی تأثیر شکل‌های مودی مختلف، خرابی‌های متنوع، موجک‌های متعامد و چندین سطح تجزیه می‌گردند. در کل سه شکل مودی اول جلو- عقب، سه شکل مودی اول پهلو- پهلو، هجده سناریوی خرابی، سی و یک موجک متعامد، سه سطح تجزیه و دو نوع خاک مختلف، مورد بررسی قرار گرفته‌است.

خرابی به‌صورت سطح مربعی، درنظر گرفته می‌شود و آدرس‌دهی براساس مرکز سطح آن صورت می‌گیرد. به‌منظور استفاده از شکل‌های مودی برای تشخیص خرابی، فرض بر این است که آسیب در ناحیه‌ی خطی سازه رخ می‌دهد. از مختصات استوانه‌ای به‌منظور آدرس‌دهی موقعیت خرابی، بهره برده شده‌است. محور مختصات H از کف برج است و زاویه‌ی θ خلاف جهت عقربه‌های ساعت در پلان و نسبت‌به محور رو به باد توربین، اندازه‌گیری می‌شود. سیستم آدرس‌دهی مختصات خرابی برج توربین بادی در شکل ۲) نشان داده شده‌است.



شکل ۲ سیستم آدرس‌دهی مختصات خرابی برج توربین بادی

به‌منظور شناسایی خرابی برج توربین بادی توسط تحلیل موجک، دو موقعیت خرابی در تراز ده‌متری و زاویه‌های صفر و ۹۰ درجه درنظر گرفته شده‌است. سناریوهای خرابی گوناگونی براساس تغییر مدول الاستیسیته از مقدار ۱۰ درصد تا ۹۰ درصد مدول الاستیسیته‌ی اولیه‌ی فولاد برج، با گام ۱۰ درصد، اعمال شده‌اند که در جدول ۱) ارائه گردیده‌اند. در کل تعداد هجده سناریوی خرابی، تعریف گردید.

جدول ١ انواع سناریوهای خرابی

سناریو	H (m)	θ (°)	α (°)	جزییات خرابی h (m)	b (m)	A (m^2)	مدول الاستیسیته (% E)
١	١٠	٠	١٩/٤	١	١	١	١٠
٢	١٠	٠	١٩/٤	١	١	١	٢٠
٣	١٠	٠	١٩/٤	١	١	١	٣٠
٤	١٠	٠	١٩/٤	١	١	١	٤٠
٥	١٠	٠	١٩/٤	١	١	١	٥٠
٦	١٠	٠	١٩/٤	١	١	١	٦٠
٧	١٠	٠	١٩/٤	١	١	١	٧٠
٨	١٠	٠	١٩/٤	١	١	١	٨٠
٩	١٠	٠	١٩/٤	١	١	١	٩٠
١٠	١٠	٩٠	١٩/٤	١	١	١	١٠
١١	١٠	٩٠	١٩/٤	١	١	١	٢٠
١٢	١٠	٩٠	١٩/٤	١	١	١	٣٠
١٣	١٠	٩٠	١٩/٤	١	١	١	٤٠
١٤	١٠	٩٠	١٩/٤	١	١	١	٥٠
١٥	١٠	٩٠	١٩/٤	١	١	١	٦٠
١٦	١٠	٩٠	١٩/٤	١	١	١	٧٠
١٧	١٠	٩٠	١٩/٤	١	١	١	٨٠
١٨	١٠	٩٠	١٩/٤	١	١	١	٩٠

برای تعیین کیفیت خرابی در مقدار ارتفاع (ΔH) و زاویه‌ی ($\Delta\theta$)، از روابط زیر بهره گرفته شده‌است.

$$\Delta H = \min \begin{cases} \left| Z - \left(H - \frac{h}{2} \right) \right| \\ \left| Z - \left(H + \frac{h}{2} \right) \right| \\ 0 \text{ if } H - \frac{h}{2} \le Z \le H + \frac{h}{2} \end{cases} \quad (٤)$$

$$\Delta\theta = \min \begin{cases} \text{I, II:} \quad \left| \beta - \theta - \frac{\alpha}{2} \right| \\ \text{III:} \quad \left| 360 - \beta + \theta - \frac{\alpha}{2} \right| \\ \text{IV:} \quad \left| \theta - \frac{\alpha}{2} - \beta \right| \\ 0 \text{ if } \theta - \frac{\alpha}{2} \le \beta \le \theta + \frac{\alpha}{2} \end{cases} \quad (٥)$$

$$|\Delta| = \sqrt{(\Delta H)^2 + \left(\Delta\theta \frac{\pi}{180} \left(\frac{R + R'}{2} \right) \right)^2}, \quad (٦)$$

در این روابط α زاویه‌ی مرکزی خرابی، β زاویه‌ی خرابی تشخیص داده‌شده توسط تحلیل موردنظر، b عرض خرابی، h بعد ارتفاعی خرابی، A سطح مقطع خرابی، R' شعاع برج در محل خرابی و Z ارتفاع خرابی تشخیص داده‌شده توسط تحلیل موردنظر است. فرض این روابط بر این است که در داخل محدوده‌ی خرابی، اختلاف برابر صفر است و در خارج از محدوده‌ی خرابی، کیفیت تشخیص خرابی (ΔH و $\Delta\theta$) براساس کمترین فاصله‌ی بین محل خرابی تا مرز خرابی، تعیین می‌گردد.

نرم‌افزار MATLAB دارای توابع موجک مختلف

است که تنوع آنها در نسخه‌های مختلف این نرم‌افزار، متفاوت می‌باشد. نسخه‌ی نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق، MATLAB R2016b است و فهرست خانواده‌ها و موجک‌های متعامد این نسخه در جدول ۲) گردآوری شده‌است. موجک متعامد، موجکی است که تبدیل موجک مرتبط با آن متعامد است؛ یعنی تبدیل موجک معکوس، الحاقی (adjoint) تبدیل موجک می‌باشد. همان‌طوری‌که مشاهده می‌ گردد بعضی از خانواده‌ها شامل چندین موجک متفاوت هستند به‌طوری‌که موجک Daubechies دارای ده موجک متفاوت است.

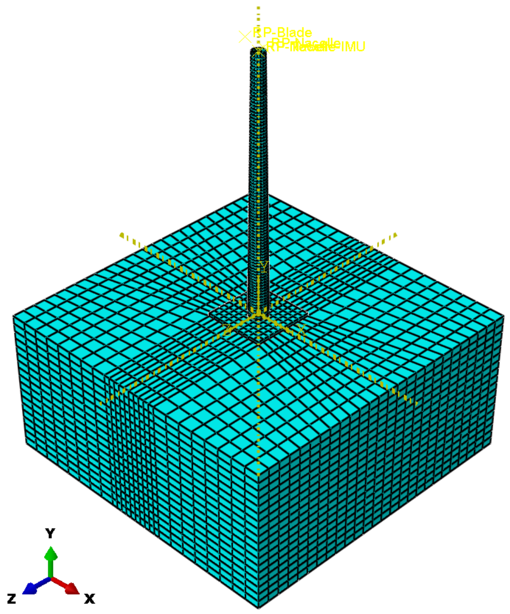
جدول ۲ فهرست خانواده‌ها و موجک‌های متعامد نرم‌افزار MATLAB R2016b[22]

خانواده	موجک‌ها
Haar	Haar
Daubechies	db1, db2, db3, db4, db5, db6, db7, db8, db9, db10, db※※
Symlets	sym2, sym3, sym4, sym5, sym6, sym7, sym8, sym※※
Coiflets	coif1, coif2, coif3, coif4, coif5
DMeyer	Dmey
Fejer-Korovkin	fk4, fk6, fk8, fk14, fk18, fk22

مطالعات عددی

در این تحقیق به‌منظور مدل‌سازی المان محدود توربین بادی و شرایط محیطی آن، از نرم‌افزار المان محدود Abaqus/CAE 6.14-2 [23] استفاده گردیده و مراحل پردازش پاسخ‌ها توسط نرم‌افزار MATLAB R2016b [22] صورت گرفته‌است.

مدل‌های استفاده‌شده در این تحقیق، مدل توربین بادی فاقد پی- خاک و مدل توربین بادی به‌همراه پی سطحی و خاک می‌باشد. توربین بادی در فضای سه‌بعدی، مدل شده و سیستم مختصات کارتزین برای مدل‌سازی المان محدود، اختیار گردیده‌است. مدل المان محدود سه‌بعدی توربین بادی در شکل ۳) به نمایش درآمده‌است. مدل‌های متعددی با درنظر گرفتن مش‌بندی‌های مختلف و با لحاظ کردن فرمولاسیون‌های انتگرال‌گیری کامل (full integration) و انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (reduced integration) و پرهیز از پدیده‌هایی همانند قفل‌شدگی برشی (shear locking) و ساعت شنی (hourglass)، ساخته و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. در مدل برج، از المان solid نوع C3D20R بهره برده شده که دارای مرتبه‌ی هندسی درجه ۲ (quadratic geometric order) می‌باشد و انتگرال‌گیری آن کاهش‌یافته، است.



شکل ۳ مدل المان محدود سه‌بعدی توربین بادی به همراه پی سطحی و خاک

بعد وتری (محیطی) و ارتفاعی المان برج برابر مقدار تقریبی ۱ متر، درنظر گرفته شده و ضخامت المان، برابر ضخامت هندسه‌ی برج اختیار شده‌است. تعداد المان‌های برج برابر ۱۳۲۰ است. پی بتنی مربعی به ابعاد ۲۰ × ۲۰ × ۱ متر مطابق مرجع [20] درنظر گرفته شد. مشخصات مدل‌های خاک استفاده‌شده در این مطالعه براساس معیار موهر- کولمب (Mohr-Coloumb)، در

جدول ۳) ارائه شده‌است. دو نوع خاک مختلف درنظر گرفته شد. خاک (۱) رس عادی تحکیم یافته است و خاک (۲) ماسه‌ی متراکم می‌باشد که سخت‌تر از خاک ۱ است. ابعاد مدل خاک به‌صورت مربعی و ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۵۰ متر اختیار شده‌است. در مدل خاک، از المان solid نوع C3D8 بهره جسته شد، هم‌چنین المان پی نیز از المان solid نوع C3D8 درنظر گرفته شد. اتصال کف خاک به‌صورت کاملا گیردار لحاظ شده‌است و فرض بر این است که بعد از ۵۰ متر ضخامت خاک مورد نظر، به بستر سنگی (bed rock) خواهیم رسید. بعد عرضی المان‌های درنظر گرفته‌شده برای پی، برابر ۲ متر بوده و به‌منظور المان‌بندی مناسب، بعد عرض خاک در زیر پی نیز برابر ۲ متر درنظر گرفته شده‌است. ضخامت المان خاک در زیر پی برابر ۲ متر بوده و باتوجه به اینکه هر چه به‌سمت سنگ بستر می‌رویم، از اهمیت بعد مش خاک، کاسته می‌شود، ضخامت تقریبی ۵ متر برای آن منظور گردیده‌است.

بعد تقریبی المان خاک در محیط بیرونی و کف آن، حدود ۵ متر اختصاص داده شده که براساس آن، بعد المان‌های میانی از مقدار ۲ متر داخلی، به‌صورت خطی به مقدار تقریبی ۵ متر خارجی، تغییر یافته‌اند. تعداد المان‌های پی و خاک به‌ترتیب برابر ۱۰۰ و ۱۲۱۶۸ است.

این مدل با توربین بادی ساحلی مبنای پنج مگاواتی NREL، مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. مشخصات توربین بادی مبنای پنج مگاواتی NREL در گزارش فنی جانکمن و دیگران [24]، ارائه شده‌است. البته در این گزارش فرکانس‌های طبیعی مود سوم طولی و عرضی توربین بادی مشخص نشده‌اند هم‌چنین اطلاعاتی درمورد سیستم خاک- پی ارائه نشده‌است.

در جدول ٤) فرکانس‌های طبیعی خمشی مدل المان‌محدود پایه‌گیردار این تحقیق و فرکانس‌های طبیعی توربین بادی مبنای پنج مگاواتی NREL، ارائه شده‌است. مطابق این نتایج، حداکثر اختلاف نسبی بین فرکانس‌های طولی و عرضی این تحقیق نسبت‌به مدل مبنا به‌ترتیب برابر ٥,٤٠٪ و ٣,٨٦٪ است. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود باوجود تفاوت بنیادی بین نرم‌افزارهای Abaqus/CAE، FAST و ADAMS، نتایج فرکانس‌های طبیعی مدل این تحقیق، حاکی از دقت قابل‌قبول نسبت‌به فرکانس‌های طبیعی توربین بادی مبنای پنج مگاواتی NREL است.

به‌منظور صحت‌سنجی مدل خاک، فرکانس‌های مودال مدل المان محدود آن، با حل بسته‌ی (closed-form solution) فرکانس‌های مودال خاک الاستیک خطی یکنواخت که براساس مرجع [25]، استخراج شده‌اند، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مقایسه که در جدول ۵) گردآوری شده‌اند، حاکی از حداکثر اختلاف ١,٠٦٪ بین مقادیر فرکانس‌های مودال بود.

جدول ۳ مشخصات مدل‌های خاک استفاده‌شده در این تحقیق [20]

مشخصات مدل	خاک ۱ (رس عادی تحکیم‌یافته)	خاک ۲ (ماسه‌ی متراکم)
وزن مخصوص غیراشباع (kN/m^3)	۱۵	۱۷
مدول یانگ (kN/m^2)	۱۰۰۰	۵۰۰۰
ضریب پواسون	۰/۳۵	۰/۳
چسبندگی (kN/m^2)	۵	۰/۱
زاویه‌ی اصطکاک (°)	۰	۳۵
زاویه‌ی اتساع (°)	۰	۵

جدول ٤ مقایسه‌ی فرکانس‌های طبیعی مدل توربین بادی پایه گیردار و نتایج جانکمن و دیگران [24]

مدل نرم‌افزار	مود اول طولی برج (Hz)	مود اول عرضی برج (Hz)	مود دوم طولی برج (Hz)	مود دوم عرضی برج (Hz)	مود سوم طولی برج (Hz)	مود سوم عرضی برج (Hz)
FAST	۰,۳۲٤۰	۰,۳۱۲۰	۲,۹۰۰۳	۲,۹۳٦۱	*	*
ADAMS	۰,۳۱۹٥	۰,۳۱٦٤	۲,۸٥۹۰	۲,۹٤۰۸	*	*
Fixed-base model	۰,۳۲۳۳	۰,۳۲۳۹	۲,۷٤۳۸	۲,۸۲۷۲	۷,۹٥۳۱	۸,۱٥۱٤

جدول ٥ فرکانس‌های طبیعی مدل المان محدود خاک و مقایسه‌ی آن با مقادیر نظری

مود	مقادیر نظری (Hz)		این تحقیق (Hz)		اختلاف نسبی (%)	
	خاک ۱	خاک ۲	خاک ۱	خاک ۲	خاک ۱	خاک ۲
۱	۰,۰۷۸٦	۰,۱٦۸۲	۰,۰۷۸٤	۰,۱٦۷۹	۰,۱۸	۰,۱۷
۲	۰,۲۳٥۷	۰,٥۰٤٥	۰,۲۳٤۷	۰,٥۰۲۳	۰,٤۳	۰,٤۳
۳	۰,۳۹۲۸	۰,۸٤۰۸	۰,۳۸۸۷	۰,۸۳۲٥	۱,۰٦	۰,۹۹

نتایج

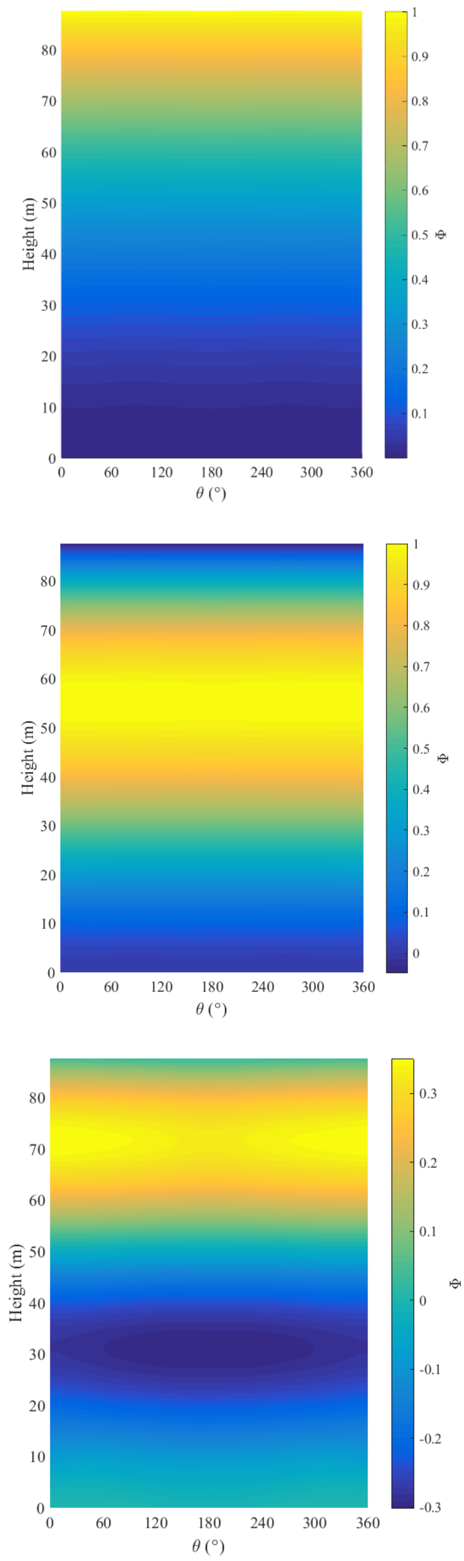
نظر به تعریف سناریوهای خرابی گوناگون، فرکانس طبیعی مدل‌های آسیب‌دیده در حالت‌های بدون اندرکنش خاک- سازه، خاک شماره‌ی (۱) و خاک شماره‌ی (۲)، محاسبه شدند. در کل شاهد کاهش فرکانس ارتعاشی سازه‌ی آسیب‌دیده نسبت‌به سازه‌ی سالم‌تر، با افزایش تدریجی خرابی هستیم که این را می‌توان به‌عنوان نشانه‌ای از وجود آسیب در سازه تلقی نمود هرچند بیانگر موقعیت آسیب نیست.

همان‌طوری‌که ذکر شد به‌منظور بررسی تشخیص خرابی، از مختصات استوانه‌ای برای نمایش موقعیت آسیب‌دیده، استفاده گردید. شکل ٤)، سه شکل مودی اصلی خمشی جلو- عقب برج توربین بادی برروی پی سطحی برای نمونه خاک (۱) و سناریوی خرابی (٥)، به‌نمایش درآمده‌است. درواقع در این شکل، پوسته‌ی بیرونی دوکی‌شکل برج توربین بادی، به‌صورت اغراق‌آمیزی، مسطح شده‌است.

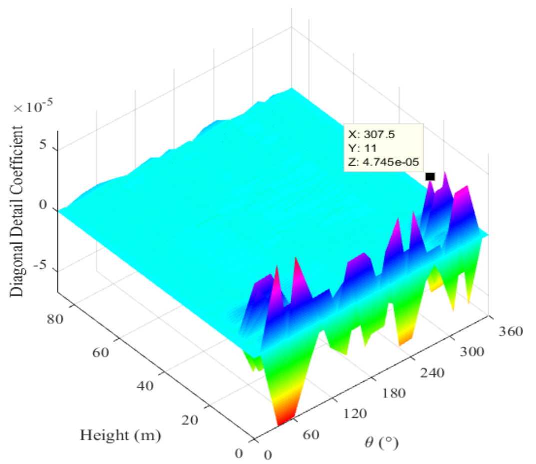
همان‌طوری‌که در این شکل مشاهده می‌شود، تغییر محسوسی در ترکیب رنگ شکل مودی علی‌رغم آسیب مصنوعی به برج توربین بادی، مشاهده نمی‌شود. ولیکن تجزیه‌ی موجک گسسته، حاکی از حقیقت دیگری است. چنان‌چه نقشه‌های مقادیر ضریب تجزیه قطری موجک، نشان‌دهنده‌ی خرابی براساس شکل‌های مودی مورد اشاره، هستند.

در شکل ٥) نقشه‌ی تجزیه‌ی موجک گسسته‌ی شکل مودی اول جلو- عقب مدل با اندرکنش خاک- سازه برروی خاک (۱) براساس سناریوی خرابی (٥) توسط موجک haar در سطح تجزیه‌ی (۱)، به نمایش درآمده و مختصات خرابی نیز با دقت مناسبی برروی آن، مشخص شده‌است.

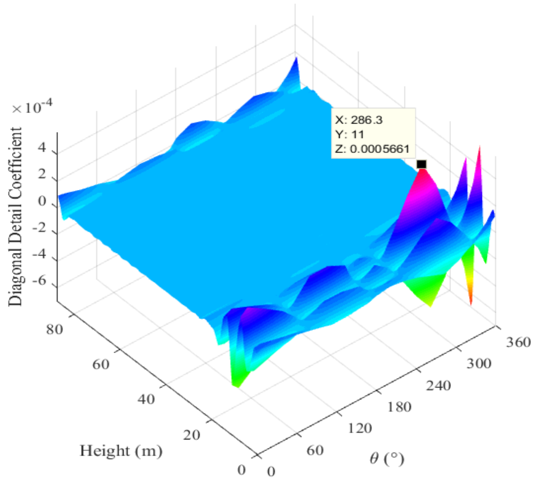
هم‌چنین شکل ٦) نقشه‌ی تجزیه‌ی موجک گسسته‌ی شکل مودی دوم جلو- عقب مدل بدون اندرکنش خاک- سازه را برروی خاک (۱) براساس سناریوی خرابی (٥) توسط موجک Fejer-Korovkin8 (FK8) در سطح تجزیه‌ی (۳) نشان می‌دهد.



شکل ٤ شکل‌های مودی اصلی خمشی جلو- عقب برج توربین بادی برروی پی سطحی برای نمونه خاک (۱) و سناریوی خرابی (۵)، (بالا) مود اول، (وسط) مود دوم، (پایین) مود سوم



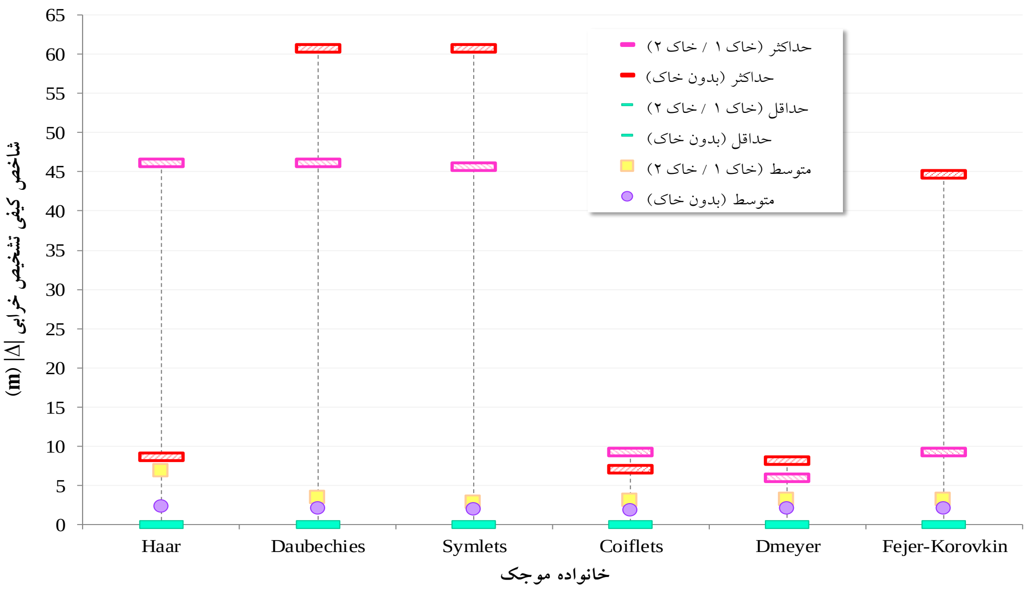
شکل ۵ نقشه‌ی تجزیه‌ی موجک گسسته شکل مودی اول جلو- عقب مدل با اندرکنش خاک- سازه (خاک ۱) طبق سناریوی خرابی (۵) توسط موجک haar در سطح (۱)



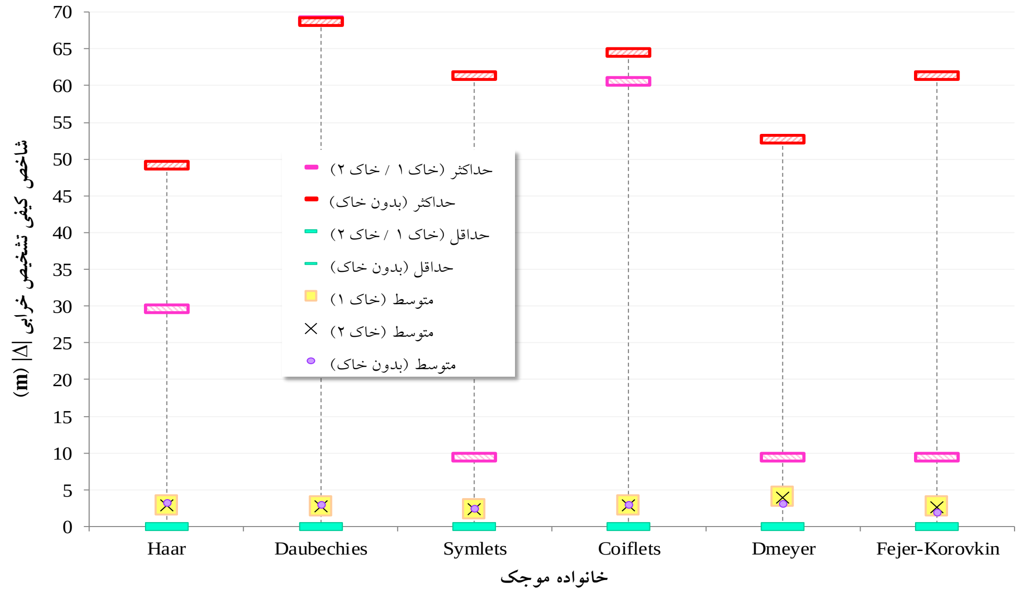
شکل ٦ نقشه‌ی تجزیه‌ی موجک گسسته‌ی شکل مودی دوم جلو- عقب مدل بدون اندرکنش خاک- سازه طبق سناریوی خرابی (۵) توسط موجک FK8 در سطح (۳)

در شکل(۷ و ۸)، شاخص کیفی تشخیص خرابی موجک‌های متعامد، به‌ترتیب به‌ازای سناریوهای خرابی ۱ الی ۹ و ۱۰ الی ۱۸ به نمایش درآمده‌است. واژگان حداقل، میانگین و حداکثر در این شکل‌ها، به‌ترتیب به کمترین، میانگین و بیشترین تفاوت بین موقعیت خرابی تعبیه‌شده و خرابی تشخیص داده‌شده، اشاره می‌نمایند. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد حداقل

شاخص مورد اشاره، برابر مقدار صفر است که بسیار ایدئال می‌باشد. البته این بدان معنی نیست که به‌ازای هر نوع شکل مودی و برای هر سناریوی خرابی، موقعیت خرابی با بهترین دقت به‌دست آید. در نقطه‌ی مقابل، ضعیف‌ترین دقت‌های تشخیص خرابی، بسیار متفاوت هستند به‌طوری‌که مطابق شکل ۸) تفاوت حالات بدون خاک و با اندرکنش خاک-سازه برای موجک Fejer-Korovkin به بالغبر ۵۰ متر می‌رسد.



شکل ۷ شاخص کیفی تشخیص خرابی موجک‌های متعامد به‌ازای سناریوهای خرابی ۱ الی ۹



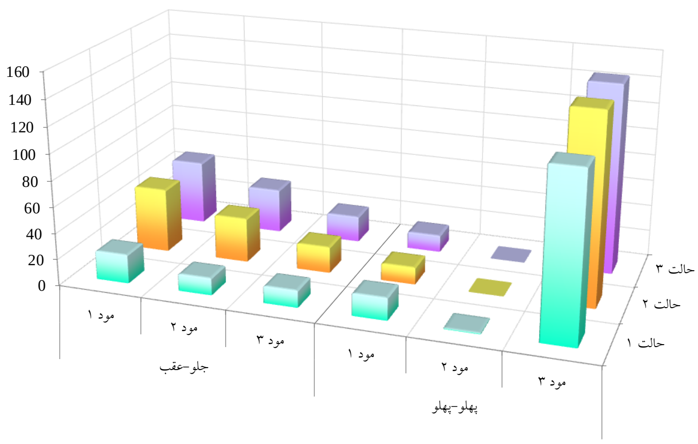
شکل ۸ شاخص کیفی تشخیص خرابی موجک‌های متعامد به‌ازای سناریوهای خرابی ۱۰ الی ۱۸

هرچند کیفیت دقت‌های تشخیص خرابی میانگین حالات با/ بدون اندرکنش خاک- سازه، اندکی متمایل به حالت بدون اندرکنش خاک- سازه است ولیکن اختلاف فاحشی در ضعیف‌ترین دقت‌های تشخیص خرابی مشاهده می‌گردد به‌گونه‌ای که دقت تشخیص خرابی با درنظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه، بهبود شایانی یافته‌است. درصورتی که به‌ازای کلیه‌ی شکل‌های مودی، سناریوهای تعریف‌شده و حالات با/بدون اندرکنش خاک- سازه، موجک‌های محدوده‌ی کیفی مجاز را به‌دست آوریم، می‌توان اثر اندرکنش خاک-سازه را به‌خوبی ارزیابی نمود. تعداد کمی موجک‌های محدوده‌ی جواب مجاز طبق کلیه‌ی سناریوها در جدول (٦) گردآوری شده و نمودار آنها در شکل ۹) و شکل ۱۰) نشان داده شده‌است.

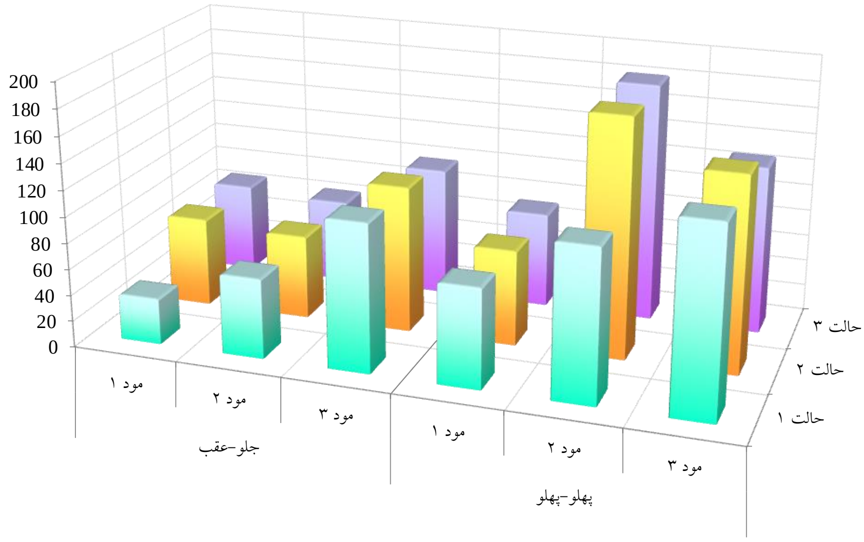
حالات ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب به عدم اندرکنش خاک- سازه، با اندرکنش خاک- سازه (خاک ۱) و با اندرکنش خاک- سازه (خاک ۲)، اشاره دارند. همان‌طوری‌که در این جدول مشاهده می‌گردد، تأثیر اندرکنش خاک-سازه قابل توجه است به‌طوری‌که شاهد افزایش کمی ۳٦ و ۱۹ درصدی تعداد جواب‌های مجاز حالت اندرکنش خاک- سازه نسبت‌به حالت بدون اندرکنش خاک- سازه به‌ترتیب برای سناریوهای ۱ الی ۹ و ۱۰ الی ۱۸ هستیم. طبق این جدول به‌جز شکل‌های مودی اول و دوم پهلو- پهلو، مابقی شکل‌های مودی دارای افزایش تعداد جواب‌های مجاز هستند که در شکل نیز مشخص است.

جدول ٦ تعداد کمی موجک‌های محدوده‌ی جواب مجاز

سناریو	حالت	مود جلو- عقب			مود پهلو- پهلو			تعداد کل
		۱	۲	۳	۱	۲	۳	
۱ الی ۹	۱	۲۲	۱۳	۱۳	۱۷	۱	۱۲٦	۱۹۲
	۲	٤۹	۳٤	۲۰	۱۳	۰	۱٤٥	۲٦۱
	۳	٤۹	۳٤	۲۰	۱۳	۰	۱٤٥	۲٦۱
۱۰ الی ۱۸	۱	۳٥	٦۱	۱۱۳	۷٦	۱۱٦	۱٤۳	٥٤٤
	۲	٦۸	٦٤	۱۱۲	۷۳	۱۸۲	۱٤۹	٦٤۸
	۳	٦۸	٦٤	۹۹	۷۳	۱۸۲	۱۲۸	٦۱٤



شکل ۹ نمودار کمی موجک‌های محدوده‌ی جواب مجاز به‌ازای سناریوهای خرابی ۱ الی ۹



شکل ۱۰ نمودار کمی موجک‌های محدوده‌ی جواب مجاز به‌ازای سناریوهای خرابی ۱۰ الی ۱۸

طبق سناریوی ۱۰ الی ۱۸ جدول ٦)، به‌جز شکل‌های مودی دوم و سوم جلو- عقب و اول و سوم پهلو-پهلو، مابقی شکل‌های مودی دارای افزایش تعداد جواب‌های مجاز هستند که در شکل نیز مشخص است. کاهش تعداد جواب‌های مجاز برای خاک (۲) نسبت‌به خاک (۱) برای شکل مودی سوم جلو- عقب و سوم پهلو- پهلو، به‌ترتیب برابر ۱۳ و ١٤ درصدی می‌باشد که در نوع خود جالب می‌باشد

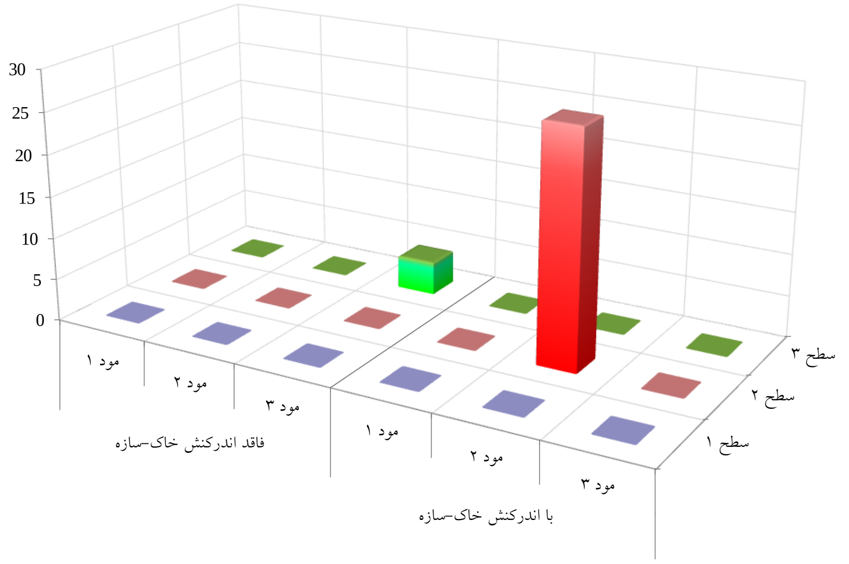
مسئله‌ی دیگر مربوط به موجک‌هایی می‌گردند که انحنای شکل‌های مودی دوم و سوم را به‌عنوان خرابی اعلام می‌نمایند. این موضوع برای هر دو حالت با/ بدون اندرکنش خاک- سازه صدق می‌کند. تعداد رخداد چنین وضعیتی برای حالت اندرکنش خاک- سازه، تقریب به هفت برابر حالت بدون اندرکنش خاک- سازه به‌ازای سناریوی خرابی ۱ الی ۹ می‌رسد، ولیکن این نسبت به‌ازای سناریوی خرابی ۱۰ الی ۱۸ برعکس می‌باشد به‌طوری‌که تعداد رخداد چنین وضعیتی برای حالت بدون اندرکنش خاک- سازه، بالغ‌بر ۱۳ برابر حالت اندرکنش خاک- سازه است. شکل ۱۱) و شکل ۱۲) نمودار تأثیر اندرکنش خاک- سازه بر تعداد موجک‌های تشخیص‌دهنده‌ی انحنای شکل مودی پهلو- پهلو به‌عنوان خرابی را به‌ترتیب برای سناریوهای ۱ الی ۹ و ۱۰ الی ۱۸ نشان می‌دهند. این شکل‌ها براساس تقریب به ۳۰۰۰۰ تحلیل موجک، ترسیم شده‌اند و تعداد کل رخداد برای این شکل‌ها به‌ترتیب برابر ۳۲ و ۲۹ مورد می‌باشد.

مطابق شکل ۱۱) رخداد چنین وضعیتی برای حالت بدون اندرکنش خاک- سازه، فقط برای شکل مودی سوم پهلو- پهلو رخ می‌دهد ولی برای حالت با اندرکنش خاک- سازه، این رخداد در شکل مودی دوم پهلو- پهلو رخ داده‌است. همچنین رخداد چنین وضعیتی برای خرابی‌های ضعیف‌تر در دو حالت با/ بدون اندرکنش خاک- سازه، بیشتر است.

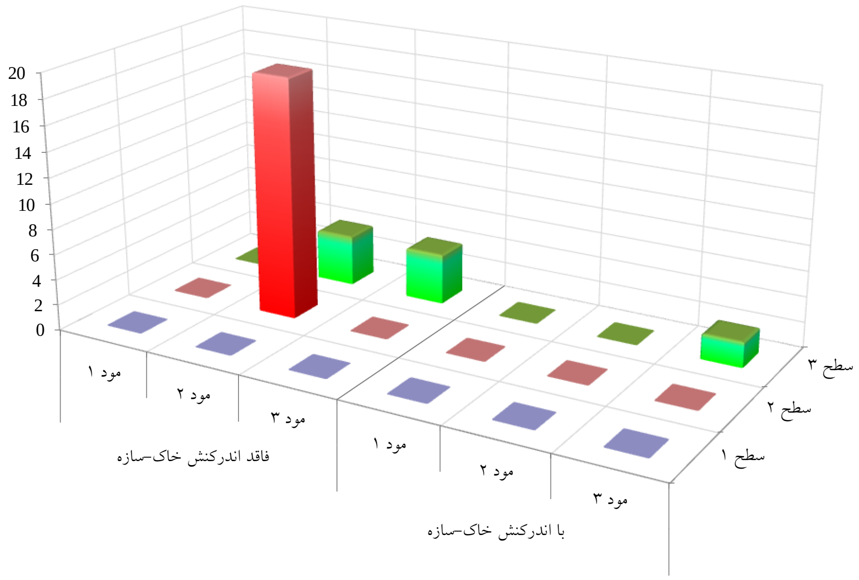
نکته‌ی جالب دیگر در سطح تجزیه‌ی موجک این است که در حالت بدون اندرکنش خاک-سازه، چنین رخدادی تنها در سطح (۳) تجزیه‌ی موجک صورت می‌گیرد ولی در حالت با اندرکنش خاک- سازه، چنین رخدادی تنها در سطح (۲) تجزیه‌ی موجک، پدیدار می‌شود.

به‌عنوان نمونه، نقشه‌ی تجزیه‌ی موجک گسسته‌ی شکل مودی دوم پهلو- پهلو مدل با اندرکنش خاک- سازه

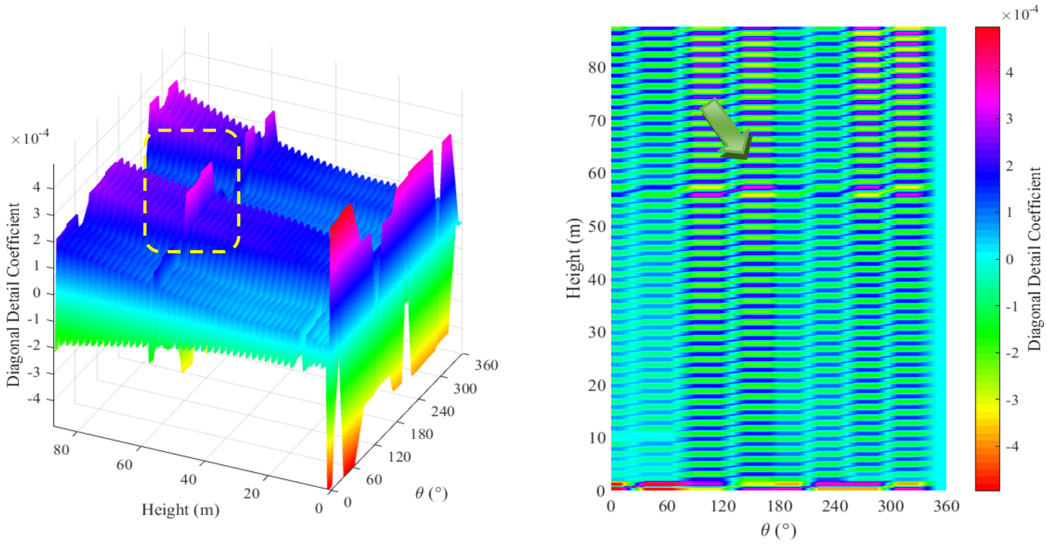
با خاک شماره‌ی (۱) و سناریوی خرابی (۵) توسط موجک haar در سطح (۲) را نشان می‌دهد و ازجمله مواردی است که در آن، انحنای شکل مودی (به‌اشتباه) به‌عنوان محل خرابی (که در شکل نیز مشخص شده)، گزارش شده‌است.



شکل ۱۱ نمودار تأثیر اندرکنش خاک- سازه بر تعداد موجک‌های تشخیص‌دهنده‌ی انحنای شکل مودی پهلو- پهلو به‌عنوان خرابی به‌ازای سناریوهای ۱ تا ۹



شکل ۱۲ نمودار تأثیر اندرکنش خاک- سازه بر تعداد موجک‌های تشخیص‌دهنده‌ی انحنای شکل مودی پهلو- پهلو به‌عنوان خرابی به‌ازای سناریوهای ۱۰ تا ۱۸



شکل ۱۳ نقشه‌ی تجزیه‌ی موجک گسسته‌ی شکل مودی دوم پهلو- پهلو مدل خاک شماره‌ی (۱) و سناریوی خرابی (۵) توسط موجک haar در سطح (۲)

در انتهای این بخش، موجک‌هایی که دارای بهترین عملکرد تشخیص موقعیت خرابی بوده‌اند، گردآوری شده‌اند. بهترین موجک‌هایی که در سناریوی ۱ الی ۹ و با/ بدون اندرکنش خاک- سازه، دارای بهترین جواب کیفی هستند، عبارت از Daubechies5، Daubechies9 و Symlets7 در سطح (۲) شکل مودی اول جلو- عقب و با دقت کیفی ۰٫۵ الی ۱٫۰ متر می‌باشند. درمقابل، بهترین موجک‌هایی که در سناریوی ۱۰ الی ۱۸ و با/ بدون اندرکنش خاک- سازه، دارای بهترین جواب کیفی هستند، عبارت از Daubechies3 و Symlets3 در سطح (۲) و Fejer-Korovkin8 در سطح (۱) شکل مودی اول پهلو- پهلو و Daubechies2 و Symlets2 در سطح (۲) شکل مودی سوم پهلو- پهلو و با دقت کیفی ۰ الی ۰٫۵ متر می‌باشند.

نتیجه‌گیری

کارایی روش پیشنهادی بااستفاده از موجک‌های متعامد در تعیین خرابی با شدت‌های کم تا زیاد و دو موقعیت مختلف همراه با/ بدون اندرکنش خاک- سازه، محک خورد و نتایج خوبی نیز به‌دست آمد. مدل المان محدود توربین بادی برروی پی سطحی و مقایسه‌ی آن با حالت پایه گیردار، انجام یافت و ملاحظه گردید اضافه نمودن خاک به مدل توربین بادی، باعث تغییر در فرکانس طبیعی مجموعه، به مقدار حداکثر ۰٫۳۵٪ می‌شود و نوع خاک، برای پی سطحی، هیچ تأثیری برروی فرکانس‌ها ندارد به‌طوری‌که اختلاف‌های نسبی فرکانس‌ها برای دو نوع خاک مختلف، مقدار ثابتی است.

بعضی نتایج حاکی از این هستند که تجزیه‌ی موجک گسسته‌ی سطح ۲، دارای کارایی بیشتری نسبت‌به سطح ۱ می‌باشد. این مسئله شاید بیانگر این موضوع باشد که مؤلفه‌ی مودی مورد نظر دارای اغتشاشاتی است که باتوجه به یکی از کاربردهای تجزیه‌ی موجک که همانا نویززدایی است، این فرآیند در تجزیه‌ی سطح (۲) منجر به عملکرد بهتری می‌شود و درواقع تجزیه‌ی سطح (۱)، وظیفه‌ی نویززدایی را انجام می‌دهد. در این تحقیق نیز عملکرد تجزیه‌ی سطح (۲) موجک دارای بهترین عملکرد به‌ازای موقعیت‌های مختلف خرابی و خاک‌های مورد نظر بود.

احتمال دارد که دقت کم بعضی موجک‌ها در شکل‌های مودهای دوم و سوم، به‌علت اندازه‌ی مش

نه‌چندان کوچک باشد و شاید بتوان با کاهش اندازه‌ی مش، دقت کیفی این موجک‌ها را در شناسایی خرابی، افزایش داد. البته موجک‌هایی که در مش بزرگ‌تر، دارای جواب قابل‌قبول باشند نیز بسیار باارزش می‌باشند به‌طوری‌که باتوجه به تعداد محدود حسگرهای ابزار دقیق، این موجک‌ها احتمالا دارای عملکرد مناسب‌تری باشند. درواقع با حس قسمت‌های کمتری از سازه، خرابی آن تشخیص داده می‌شود.

هرچند این تحقیق، حاکی از برابری نتایج خاک‌های (۱) و (۲) برای «موقعیت خرابی در ارتفاع ۱۰ متر و زاویه‌ی صفر درجه» بود ولیکن شاهد نابرابری نتایج برای «موقعیت خرابی در ارتفاع ۱۰ متر و زاویه‌ی ۹۰ درجه» است. بااینکه فرکانس‌های ارتعاشی یکسانی برای هر دو مدل خاک (۱) و (۲) به‌دست آمد ولی تغییرات بسیار ناچیز در شکل مودی (باتوجه به نوع خاک)، سبب اختلاف در نتایج شده‌است.

نتایج عددی نشان می‌دهند هرچه‌قدر شدت خرابی کاهش می‌یابد، شناسایی موقعیت دقیق آن نیز سخت‌تر می‌گردد. به‌طورکلی مشاهده می‌گردد که درنظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه باعث افزایش دقت تشخیص خرابی می‌شود.

مراجع

1. Shohag, M. A. S., Hammel, E. C., Olawale, D. O., and Okoli, O. I., "Damage Mitigation Techniques in Wind Turbine Blades: A Review", *Wind Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 185-210, (2017).
2. Ohlenforst, k., Sawyer, S., Dutton, A., and et al., "Global Wind Report 2018", Global Wind Energy Council (GWEC), (2019).
3. Hau, E., "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics", Springer, Berlin, (2005).
4. GE's Haliade-X 12 MW prototype to be installed in Rotterdam, https://www.genewsroom.com/press-releases/ges-haliade-x-12-mw-prototype-be-installed-rotterdam, (2019).
5. García Márquez, F. P., Tobias, A. M., Pinar Pérez, J. M., and Papaelias, M., "Condition Monitoring of Wind Turbines: Techniques and Methods", *Renew. Energy*, Vol. 49, pp. 169–78, (2012).
6. Tegen, S., Lantz, E., Hand, M., Maples, B., Smith, A., and Schwabe, P., "Cost of Wind Energy Review. NREL/TP-5000-56266", Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, US, (2011).
7. Sundaresan, M. J., Schulz, M. J., Ghoshal, A., "Structural Health Monitoring Static Test of a Wind Turbine Blade. NREL Subcontract Report No.: NREL/SR-500-28719", National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393, US, (2002).
8. Fan, W., and Qiao, P., "A 2-D Continuous Wavelet Transform of Mode Shape Data for Damage Detection of Plate Structures", solids and structures, Vol. 46, pp. 1-17, (2009).
9. Antoine, J. P., Murenzi, R., Vandergheynst, P., and et al., "Two-Dimensional Wavelets and Their Relatives, Cambridge University Press, (2004).
10. Doliński, Ł. and Krawczuk, M., "Damage Detection in Turbine Wind Blades by Vibration Based Methods", *Journal of Physics: Conference Series.* Vol. 181, No. 1, pp. 1-8, (2009).

11. Kenna, A., and Basu, B., "Damage Detection in Wind Turbine Towers Using a Finite Element Model and Discrete Wavelet Transform of Strain Signals", *Journal of Physics: Conference Series 628,* Vol. 628, No. 1, pp. 1-8, (2015).
12. Huang, C. S., Hung, S. L., Lin, C. I., and et al., "A Wavelet-based Approach to Identifying Structural Modal Parameters from Seismic Response and Free Vibration Data", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,* Vol. 20, pp. 408-423, (2005).
13. He, W. Y., Zhu, S., and Chen, Z. W., "Wavelet-based Multi-scale Finite Element Modeling and Modal Identification for Structural Damage Detection", *Advances in Structural Engineering,* Vol. 20, No. 8, pp. 1185-1195, (2017).
14. Zaaijer, M., "Foundation Models for the Dynamic Response of Offshore Wind Turbines", Proceedings of MAREC., (2002).
15. Camp, T., Morris, M., Van Rooij, R., Van Der Tempel, J., Zaaijer, M., Henderson, A., and et al., "Design Methods for Offshore Wind Turbines at Exposed Sites. Final Report of the OWTES Project", Garrad Hassan and Partners Ltd, Bristol, UK, (2003).
16. Zaaijer, M., "Foundation Modelling to Assess Dynamic Behaviour of Offshore Wind Turbines", *Appl Ocean Res,* Vol. 28, No. 1, pp. 45-57, (2006).
17. Murtagh, P., Basu, B., and Broderick, B., "Along-wind Response of a Wind Turbine Tower with Blade Coupling Subjected to Rotationally Sampled Wind Loading", *Eng Struct,* Vol. 27, No. 8, pp. 1209-1219, (2005).
18. Bush, E., Manuel, L., "Foundation Models for Offshore Wind Turbines", In: ASME wind energy symposium, AIAA., (2009).
19. Adhikari, S., and Bhattacharya, S., "Dynamic Analysis of Wind Turbine Towers on Flexible Foundations", *Shock Vib,* Vol. 19, No. 1, pp. 37-56, (2012).
20. Fitzgerald, B., and Basu, B., "Structural Control of Wind Turbines with Soil Structure Interaction Included", *Engineering Structures,* Vol. 111, pp. 131-151, (2016).
21. Speckman, H., and Henrich, R., "Structural Health Monitoring (SHM) - Overview on Technologies under Development", *Proceedings of the 16th World Conference on NDT*, Vol. 1, Montreal-Canada, (2004).
22. MATLAB R2016b x64, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, US, (2016).
23. Abaqus/CAE 6.14-2 x64, The Dassault Systèmes®, (2014).
24. Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G., "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report No. NREL/TP-500- 38060", National Renewable Energy Laboratory, Golden, (2009).
25. Kramer, S. L., "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, Upper Saddle River, US, (1996).